

V. ŚWIATŁO W BUDYNKU

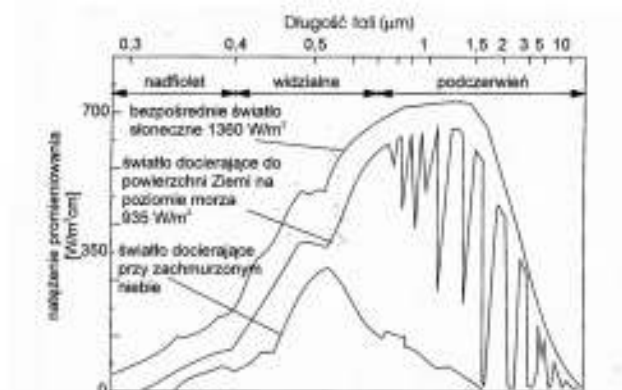
28 Sformułowanie problemu

Zagadnienia adsorpcji, czyli pochłaniania oraz odbicia promieniowania świetlnego nie należą do klasycznego programu fizyki budowli. Jednak ich znaczenie dla jakości zamieszkania i pracy jest coraz istotniejsze. Fakt ten spowodował podanie elementarnych praw, którym podlega oświetlenie w budynkach. Mamy tu do czynienia z zadaniami elementarnymi, kiedy promieniowanie pada na płaszczyznę.

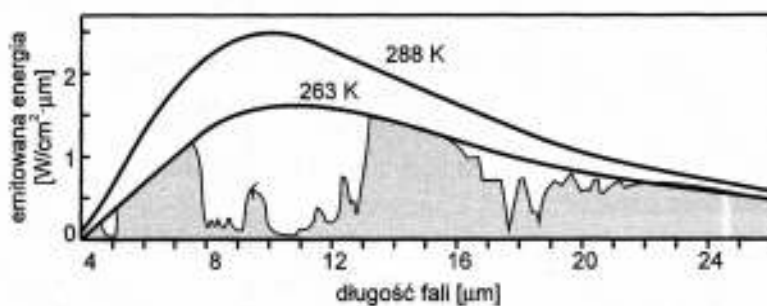
Analizować będziemy problemy oświetlenia występujące w budownictwie, czyli modelowania zadań przejmowania, adsorpcji i odbicia promieniowania świetlnego przez powierzchnie budowli. Bardziej złożone są zadania oświetlenia brył budynków.

Promieniowanie świetlne zawsze zawiera wpływ światła rozproszonego i ukierunkowanego. Rozkłady te są podobne jak przy analizie cieplnej części promieniowania słonecznego. Podobnie występuje również problem absorpcji promieniowania, odbicia itd. Promieniowanie słoneczne działa na powierzchnię materiału wywołując ogólnie reakcje fotochemiczne - podstawowe w całej przyrodzie. Zachodzące reakcje wpływają też na wzrost kruchości materiału warstw powierzchniowych lakierów, malowideł czy tynków.

Promieniowanie świetlne przedstawiamy najczęściej w postaci rozkładu natężenia promieniowania świetlnego w funkcji długości fali [nm]. Wielkość tę określa irradancja słoneczna $I_0 [Wm^{-2} \mu m^{-1}]$.

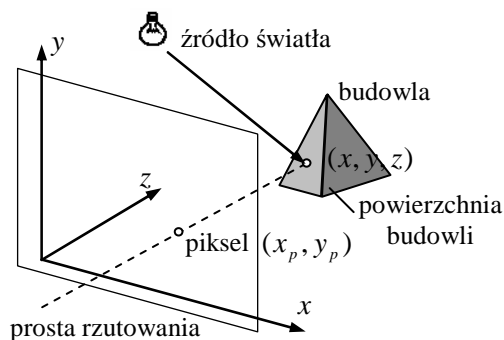


Rys. 28.1. Irradiacja słoneczna



Rys. 28.2. Widmo promieniowania ciała doskonale czarnego

W zakresie nas interesującym mamy przedział ultrafioletu (UV), promieniowania widzialnego i podczerwieni.



Rys. 28.3. Schemat oświetlenia ściany

Podstawowy problem oświetlenia, (por. rys.28.3) można sformułować:

Od czego zależy stopień jasności lub kolor punktu (piksela) (x_p, y_p) , będącego rzutem punktu (x, y, z) na S , gdy na scenie występuje źródło światła?

Stopień jasności lub kolor punktu (piksela) (x_p, y_p) na ekranie S zależy od wielu czynników, wśród których najistotniejsze to:

- geometria układu (wzajemnego usytuowania ściany budowli i źródła światła, kształtu obiektu, sposobu rzutowania),
- charakterystyki źródła światła (intensywności świecenia, koloru, tłumienia światła w przestrzeni, kierunkowości),

- charakterystyki powierzchni obiektu (odbijania, rozpraszania, pochłaniania, przepuszczania, koloru powierzchni),
- charakterystyki rozchodzenia się światła odbitego,
- charakterystyki światła rozproszonego,
- oświetlenia obiektu światłem odbitym (np. od innych obiektów znajdujących się na scenie).

Jakie przyjąć założenia?

Jak dla przyjętych założeń obliczyć stopień jasności lub kolor punktu (piksela) (x_p, y_p) ?

29 Podstawowe modele oświetlenia

W naszych rozważaniach wyróżnimy następujące modele oświetlenia:

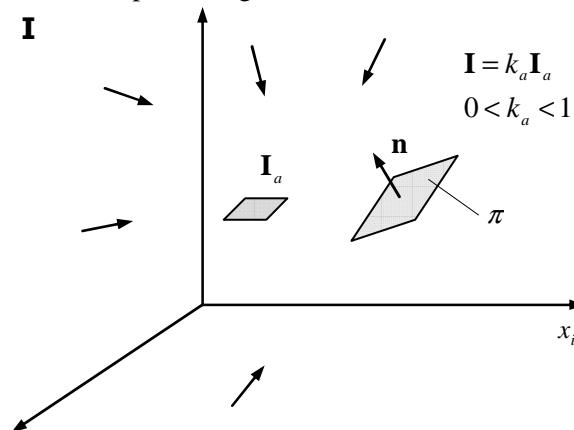
- model oświetlenia światłem otoczenia,
- model dla obiektów o odbiciu dyfuzyjnym,
- model dla obiektów o odbiciu zwierciadlanym,
- model obiektów przezroczystych,

Model oświetlenia światłem otoczenia

Założenia:

- Na scenie występuje jedynie światło rozproszone (bezkierunkowe).
- Powierzchnie obiektów odbijają światło.

Model oświetlenia rozproszonego



Rys. 29.1. Światło rozproszone

$$\mathbf{I} = k_a \cdot \mathbf{I}_a, \quad (29.1)$$

gdzie:

\mathbf{I} - intensywność oświetlenia punktu powierzchni,

\mathbf{I}_a - intensywność dla światła rozproszonego,

k_a - współczynnik odbicia światła rozproszonego przez powierzchnię, współczynnik ten zależy od materiału z jakiego wykonany jest obiekt, $k_a \in [0,1]$;

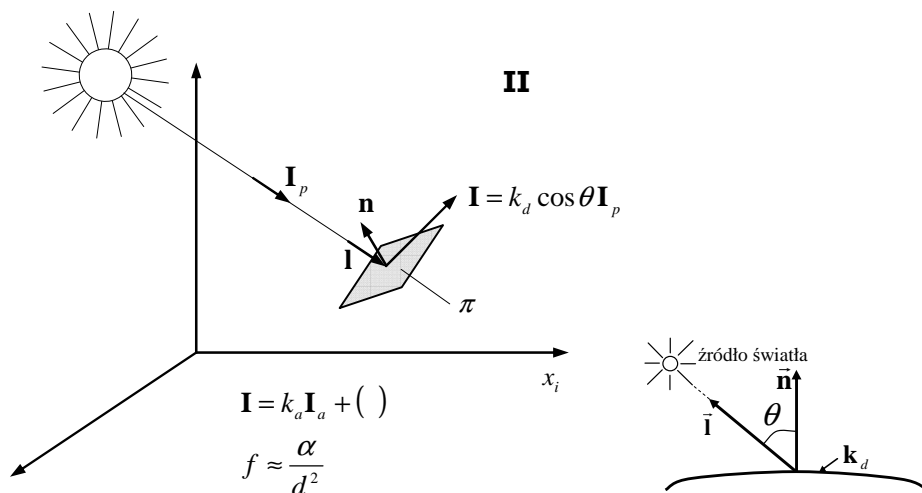
Model oświetlenia dla powierzchni rozpraszających (dyfuzyjnych):

Założenia:

- Na scenie występuje punktowe źródło światła emitujące światło tak samo we wszystkich kierunkach.
- Powierzchnie obiektów rozpraszają światło (są matowe).

Model oświetlenia:

Model opiera się na prawie cosinusów Lamberta.



Rys. 29.2. Światło ukierunkowane

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_p \cdot k_d \cdot \cos \theta, \quad (29.2)$$

gdzie:

\mathbf{I} - intensywność oświetlenia punktu powierzchni,

\mathbf{I}_p - intensywność świecenia punktowego źródła światła,

k_d - współczynnik odbicia przez powierzchnię, współczynnik zależy od materiału z jakiego wykonany jest obiekt,
 Θ - kąt między kierunkiem padania światła a prostopadłą do oświetlanej powierzchni w badanym punkcie, $\Theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$;

Jeśli odpowiednie kierunki opisać znormalizowanymi wektorami, to model można zapisać też jako

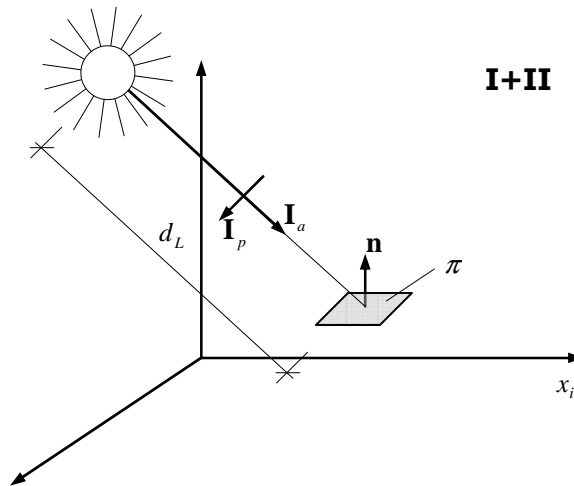
$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_p \cdot k_d \cdot (\bar{\mathbf{n}} \cdot \bar{\mathbf{l}}), \quad (29.3)$$

gdzie:

$\bar{\mathbf{n}}$ - jednostkowy wektor normalny do powierzchni w badanym punkcie,

$\bar{\mathbf{l}}$ - jednostkowy wektor opisujący kierunek padania światła.

30 Złożone opisy oświetlenia



Rys. 30.1. Światło rozproszone i ukierunkowane

Model ten polega na połączeniu opisu opartego na prawie cosinusów z opisem dla światła rozproszonego

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_a \cdot k_a + \mathbf{I}_p \cdot k_d \cdot (\bar{\mathbf{n}} \cdot \bar{\mathbf{l}}). \quad (30.1)$$

Z doświadczenia wiadomo, że obiekty położone dalej od źródła światła, są oświetlane słabiej. Zmodyfikujemy więc model uwzględniając zjawiska tłumienia przez wprowadzeniu współczynnika tłumienia f_{att} .

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_a \cdot k_a + f_{att} \cdot \mathbf{I}_p \cdot k_d \cdot (\bar{\mathbf{n}} \cdot \bar{\mathbf{l}}). \quad (30.2)$$

Jak uzależnić współczynnik f_{att} od odległości między źródłem światła a badanym punktem powierzchni?

Z fizyki wiadomo, że

$$f_{att} = \frac{1}{d_L^2}, \quad (30.3)$$

gdzie d_L jest odległością pomiędzy źródłem światła a punktem oświetlanej powierzchni.

W praktyce powyższy wzór nie daje zbyt dobrych wyników, bowiem:

- jeśli d_L jest duże, f_{att} zmienia się nieznacznie nawet dla daleko położonych od siebie powierzchni,
- jeśli d_L jest małe, f_{att} zmienia się bardzo znacznie nawet dla blisko położonych od siebie powierzchni,

W praktycznych zastosowaniach stosuje się więc bardziej ogólną zależność postaci:

$$f_{att} = \min\left(\frac{1}{c_1 + c_2 d_L + c_3 d_L^2}, 1\right), \quad (30.4)$$

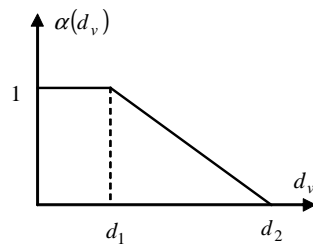
gdzie c_1, c_2, c_3 są stałymi dobieranymi empirycznie.

Wiadomo także, że obiekty położone dalej od obserwatora, są postrzegane jako oświetlane słabiej.

Zjawisko to uwzględnia się w prosty sposób, modyfikując wyznaczoną przy pomocy poprzednio omówionych modeli intensywność \mathbf{I} następująco:

$$\mathbf{I}' = \mathbf{I} \cdot \alpha(d_v), \quad (30.5)$$

gdzie: d_v jest odległością oświetlanego punktu powierzchni od obserwatora, a $\alpha(d_v)$ to przykładowa funkcja o przebiegu pokazanym na rysunku 30.2.

Rys. 30.2. Przebieg funkcji $\alpha(d_v)$

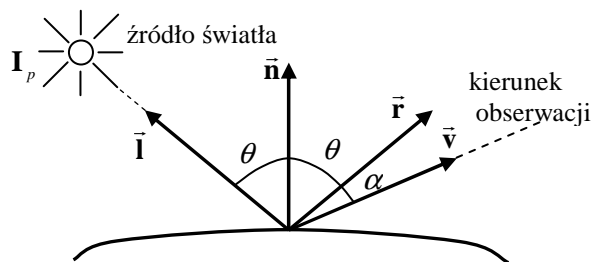
31 Oświetlenie powierzchni odbijających światło

Omówione poprzednio problemy dotyczą ogólnej teorii rozprzestrzeniania się i adsorpcji światła. Obecnie omówimy zagadnienia naświetlenia powierzchni w dwóch krańcowych przypadkach:

- powierzchni odbijającej i adsorbującej światło;
- powierzchni przepuszczającej promienie świetlne.

Założenia:

- Na scenie występuje punktowe źródło światła emitujące światło tak samo we wszystkich kierunkach.
- Powierzchnie obiektów odbijają światło (różnie w różnych kierunkach).
Przykładem realizacji tego modelu jest idealne zwierciadło



Rys. 31.1. Idealne zwierciadło

Oświetlany punkt powierzchni, będzie widoczny dla obserwatora tylko wtedy, gdy kierunek wektora \vec{R} będzie się pokrywał z kierunkiem wektora \vec{V} .

Wydaje się sensowne poszukiwanie modelu powierzchni, który łączy własności rozpraszania i odbijania światła. Modelem takim jest model zwany *modelem Phonga* (zapropomował go Phong Bui Tuong).

W tym modelu oświetlenia strumień światła opisuje równanie:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_a \cdot k_a + f_{att} \cdot \mathbf{I}_p \cdot (k_d \cdot \cos \Theta + W(\Theta) \cdot \cos^n \alpha), \quad (31.1)$$

gdzie:

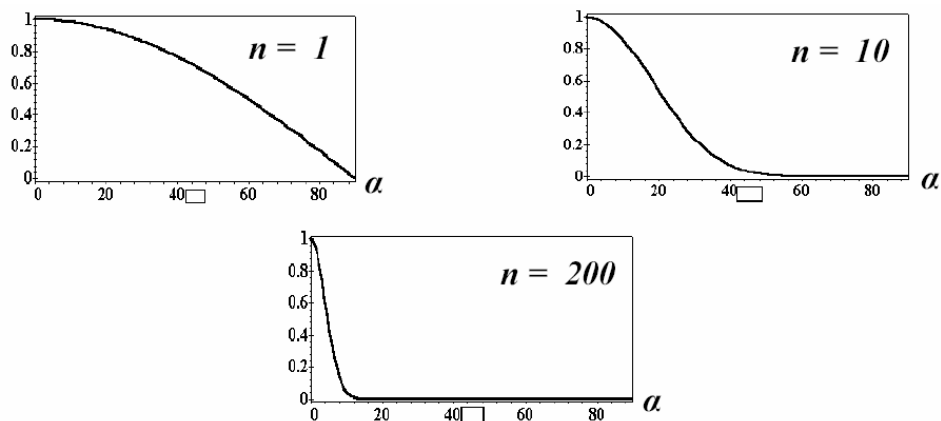
$W(\Theta)$ - pewna funkcja kąta Θ (zależy od własności materiału), często funkcję tą zastępuje się stałą k_s , czyli parametr nie zależy wtedy od kąta pod jakim światło pada na analizowany punkt powierzchni,

n - stała;

Model Phong można wtedy zapisać w postaci

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_a \cdot k_a + f_{att} \cdot \mathbf{I}_p \cdot (k_d \cdot (\bar{\mathbf{n}} \cdot \bar{\mathbf{l}}) + k_s \cdot (\bar{\mathbf{v}} \cdot \bar{\mathbf{r}})^n). \quad (31.2)$$

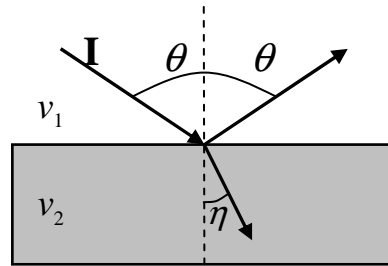
W modelu podstawową rolę odgrywa składnik $\cos^n \alpha$, uzależniający intensywność oświetlenia punktu powierzchni od kąta obserwacji α . Wyjaśnić można to badając przebieg funkcji $\cos^n \alpha$.



Rys. 31.2. Przebieg funkcji $\cos^n \alpha$

Oświetlenie obiektów, które przepuszczają światło

Odmianą sytuację mamy przy przejściu z jednego ośrodka przezroczystego do drugiego, kiedy promień świetlny ulega załamaniu.

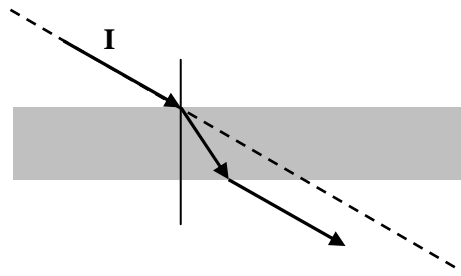


Rys. 31.3. Model załamania światła

Zjawisko jest opisane przez prawo Snella

$$\frac{\sin \Theta}{\sin \eta} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (31.3)$$

gdzie v_1 i v_2 są odpowiednio prędkościami rozchodzenia się światła w pierwszym i drugim ośrodku.



Rys. 31.4. Podwójne załamanie światła

Przy przejściu przez przezroczystą płytkę następuje podwójne załamanie, które powoduje równoległe przesunięcie promienia.

Przesunięcie promienia zależy od poprzednio wymienionych parametrów i grubości płytki. Omówione podstawy fizyczne stosuje się do budowy modeli przechodzenia światła przez obiekty. Dla przykładu, znane są modele opisujące przechodzenie światła przez szyby, są one wykorzystywane w symulatorach lotu.

32 Powierzchnie adsorbujące promieniowanie

Ciemne powierzchnie wystawione na słońce ogrzewają się silniej niż jasne. Czarna powierzchnia w całości pochłania promieniowanie świetlne, a biała

odbija je. Energia zaadsorbowana na ciemniej powierzchni zamienia się w ciepło i prowadzi do podwyższenia temperatury ściany. W naszych warunkach w zimie trzeba by elewację pomalować na kolor ciemny i wykorzystywać do ogrzewania mieszkań w zimie, ale niestety ogrzewać będzie się również nadmiernie i w lecie.

Byłoby więc wskazane mieć farby zmieniające właściwości adsorpcyjne promieniowania powierzchniowego w zależności od temperatury. Tego typu zjawisko zmiany barwy pod wpływem temperatury nazywamy *termochromizmem*. Jest to na ogół proces wielokrotnie odwracalny, który w przyszłości może służyć do pozyskiwania energii promieniowania słonecznego na cele grzewcze.

Zmiana barwy zachodzi m.in. w wyniku przemiany fazowej, zmiany struktury krystalicznej i in.

W praktycznych zastosowaniach interesują nas dodatki do farb – *pigmenty termochromowe*, które zapewnią większą absorpcję promieniowania świetlnego w niższych temperaturach – w okresie grzewczym, natomiast mniejszą w wyższych – latem. W efekcie można uzyskać podwyższenie temperatury o 3-4⁰C zimą, co znacznie poprawi bilans cieplny budynku, szczególnie zaś może skrócić okres grzewczy.

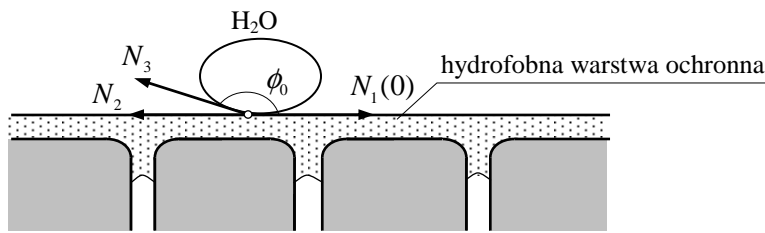
Powstaje tu jednak nowy problem: przekazanie zaadsorbowanej energii do ściany, a nie do otoczenia. Wynika stąd, że adsorbująca promieniowanie powłoka malarska musi być od otoczenia oddzielona przezroczystą izolacją cieplną.

Zupełnie inne wymagania należy stawiać powłokom kryjącym powierzchnie składów i magazynów. W tym przypadku powłoka powinna maksymalnie odbijać promieniowanie a nie adsorbować.

33 Spadek napięcia powierzchniowego wywołany przez radiację

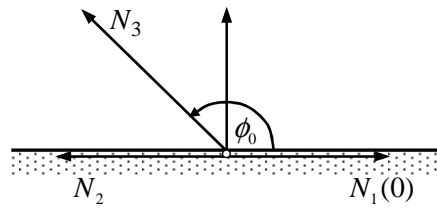
Przedmiotem obecnych rozważań będą zmiany własności warstw powierzchniowych budowli pokrytych warstwami tynku i farb w wyniku działania promieni słonecznych. Mamy wówczas do czynienia z *reakcjami fotochemicznymi, których efektem jest spadek napięcia powierzchniowego* oraz zmiana własności warstw kryjących.

Analizujemy tu procesy adsorpcji energii promieniowania przez powierzchnię budowli pokrytej cienką warstwą hydrofobowego materiału, np. farby olejnej.



Rys. 31.5. Oddziaływania kropli z hydrofobizowaną powierzchnią

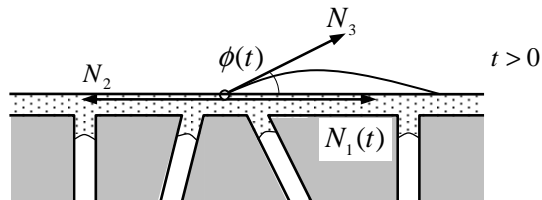
W kontakcie kropli na powierzchni występują: siły napięcia powierzchniowego między powłoką i cieczą N_1 , powłoką i gazem N_2 oraz cieczą i gazem N_3 , siły te działają na powierzchnię A

Rys. 31.6. Siły powierzchniowe ($t=0_+$)

Warunki równowagi na początku procesu prowadzą do równania

$$-N_2 + N_1(0) + N_3 \cos \phi_0 = 0, \quad t=0_+ \quad (33.1)$$

Z upływem czasu kropla rozlewa się po powierzchni, czyli maleje kąt zwilżenia ϕ .



Rys. 31.7. Zmiana sił powierzchniowych w wyniku reakcji fotochemicznych

Warunki równowagi w chwili $t > 0$ mają formę

$$-N_2 + N_1(t) + N_3 \cos \phi'(t) = 0. \quad (33.2)$$

Z przyrównania obu równań uzyskujemy

$$N_1(0) + N_3 \cos \phi_0 = N_1(t) + N_3 \cos \phi'(t). \quad (33.3)$$

Stąd przyrost siły N_1 wynosi

$$\Delta N_1 = N_1(t) - N_1(0) = \Delta N_1 = N_3 (\cos \phi - \cos \phi'(t)), \quad (33.4)$$

stąd

$$N_1(0) - N_1(t) = N_3 \cos \phi(t) \left(1 - \frac{\cos \phi_0}{\cos \phi(t)}\right) \quad (33.5)$$

lub

$$N_1(t) - N_1(0) = N_3 \cos \phi_0 \left(1 - \frac{\cos \phi(t)}{\cos \phi_0}\right), \quad (33.6)$$

gdzie $0 < \frac{\cos \phi_0}{\cos \phi(t)} < 1$, $\Delta N_1 = N_3 \cos \phi_0 \left(1 - \frac{\cos \phi(t)}{\cos \phi_0}\right)$, $1 < \frac{\cos \phi(t)}{\cos \phi_0} < \infty$. (33.7)

Zauważmy, iż zmiana kąta zwilżenia wynika z powierzchniowej reakcji fotochemicznej wywołanej przez radiację słoneczną o intensywności I_0

$$\phi_0 - \phi(t) = a(\mathbf{I} \cdot \mathbf{n}), \text{ stąd } \phi(t) = \phi_0 - a(\mathbf{I} \cdot \mathbf{n}). \quad (33.8)$$

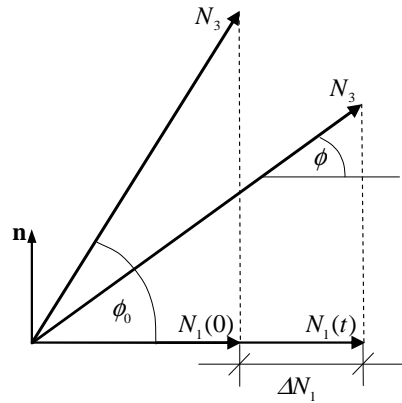
Wprowadzając parametr $\omega = \frac{\cos \phi(t)}{\cos \phi_0}$ gdzie $1 < \omega < \frac{1}{\cos \phi_0}$ uzyskamy

$$\Delta N_1 = N_3 \cos \phi_0 (1 - \omega). \quad (33.9)$$

Parametr ω określający spadek napięcia powierzchniowego wynosi

$$\omega = \frac{1}{\cos \phi_0} \cos[\phi_0 - a(\mathbf{I} \cdot \mathbf{n})]. \quad (33.10)$$

Spadek napięcia powierzchniowego przedstawiono na rysunku 33.4.

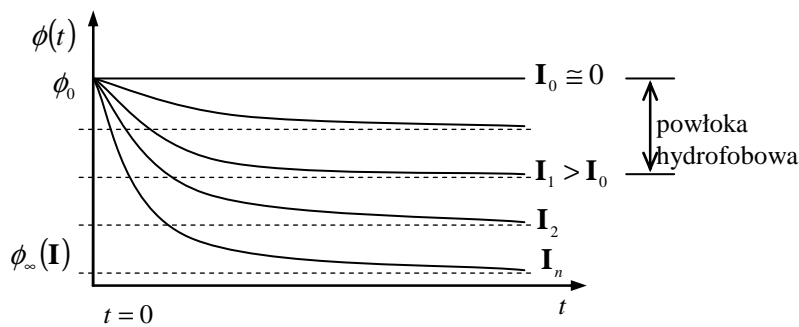


Rys. 31.8. Zmiany napięcia powierzchniowego ΔN_0 w wyniku promieniowania

Parametr ω określa nam jak zmienia się napięcie powierzchniowe między powierzchnią hydrofobizowaną a cieczą. Na samym początku napięcie powierzchniowe wynosi $N_1(0) A^{-1}$, po pewnym czasie mamy $N'_1(t)A^{-1}$.

Równanie określające uszkodzenia powierzchni – zmiany kąta zwilżenia $\phi(t)$ zależy od wektora radiacji świetlnej I_0 i ma postać

$$\phi(t) = \phi_\infty + (\phi_0 - \phi_\infty) e^{-\beta t}, \quad \phi_\infty = \phi_\infty(\mathbf{I}), \quad \beta = \beta(\mathbf{I}). \quad (33.11)$$



Rys. 31.9. Zmiany kąta zwilżenia powierzchniowego $\phi(t)$ w wyniku radiacji słonecznej \mathbf{I}

W badaniach laboratoryjnych określa się spadek w czasie kąta zwilżenia cieczy ϕ na powłoce zhydrofobizowanej w zależności od intensywności oświetlenia \mathbf{I} powłoki. Analityczny opis tych zmian funkcji postaci (33.3) pozwala na szacowanie dopuszczalnego okresu eksploatacji powłoki.

Zadanie V.1

Należy oszacować żywotność powłoki hydrofobizującej poddanej działaniu stałego oświetlenia o intensywności \mathbf{I}_1 , padającego prostopadle do powierzchni powłoki. Pomierzono początkowy kąt zwilżenia ϕ_0 oraz zmiany w czasie tego kąta dla różnych poziomów intensywności oświetlenia $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \dots, \mathbf{I}_n$ (por. rys. 33.5). Znanе są początkowe wartości napięcia powierzchniowego między cieczą a powłoką $N_1(0)$ oraz gazem a cieczą (H₂O) N_3 . Graniczny spadek napięcia wynosi maksimum 40 % $N_1(0)$, czyli napięcie $N_1(t) \leq 0,6 N_1(0)$.

Odpowiedź:

Wykorzystując wzór na spadek ΔN_1 napięcia powierzchniowego (33.4) otrzymamy kolejno:

$$N_1(0) - 0,6N_1(0) = N_3(\cos \phi(t) - \cos \phi_0) \quad \text{oraz} \quad 0,4 \frac{N_1(0)}{N_3} = \cos \phi(t) - \cos \phi_0,$$

$$\text{stąd} \quad \phi(t)_{gr} = \arccos \left\{ \cos \phi_0 + 0,4 \frac{N_1(0)}{N_3} \right\}$$

Znając z kolei krzywą $\phi(t)$ dla intensywności \mathbf{I}_1 , tj. znając $\phi_\infty(\mathbf{I}_1)$ i $\beta(\mathbf{I}_1)$ wyznaczmy czas krytyczny t_{ur} i równanie:

$$\arccos \left\{ \cos \phi_0 + 0,4 \frac{N_1(0)}{N_3} \right\} = \phi_\infty + (\phi_0 - \phi_\infty) e^{-\beta t} \rightarrow t = t_{ur}.$$